

大爆炸理论

陈洪

大爆炸理论是研究宇宙的一种方法。几千年以前人们关于“天圆地方”的争论就是对宇宙的研究的开始。哥白尼“日心说”的提出，冲破了“地心说”的束缚，宇宙学的研究取得重大突破。在1917年，著名科学家爱因斯坦建立广义相对论后，很快就应用于宇宙学的研究，掀起宇宙学的热潮。直到现在最成熟的宇宙学理论——大爆炸理论的提出，使得宇宙学的研究又达到一个高峰。然而研究的脚步并没有停下，一直在前进。

一种理论的提出，往往需要经过多个阶段。笔者将此分为以下几个阶段：特殊事件发现、解释研究、理论提出、证明及前景和困难。

量子理论和相对论就是很好的例子。这两种理论最初来自两个特殊现象，即有名的两朵乌云，一朵是黑体辐射的紫外灾难，另一朵是迈克尔孙实验结果和以太漂移说相矛盾。为了解决这两个特殊现象，科学家做了大量的解释和研究，最终得到了这两个理论。而后得到大量证据支持。同样我们就用这种方式来讲解大爆炸理论。

特殊事件发现

1912年美国科学家斯里弗在观察远处涡旋星云的光谱时发现，地面接收到的多数星云发出光谱的波长向红端移动。虽然当时并不知道星云就是一种天体。按当时的物理知识，只能用光源运动的多普勒效应来解释。

奥地利物理学家多普勒从声波传播中发现，波的频率会因声源与观测者的相对运动而变化，并解释了这种现象，因而被叫作多普勒效应。许多人都熟悉，火车的汽笛声在列车向你奔驰而来时，音调会变高；而当它掠过你离去时，声音马上就会低沉下来。音调高，表明声波的频率较高；音调低，则声波频率较低。这并不意味着声源发生了什么变化，而是由于声源与观测者的相对运动所致。当声源对着观察者相向而来时，声音频率提高；当声源背离观察者而去时，声音频率降低。

多普勒效应是一切种类波所共有的现象，也适用于光波和电磁波。测定光的多普勒效应的最好办法是观测它的谱线的变化。例如，大多数恒星的光

谱里，在紫外光部分都有两条暗线，这是被钙气吸收所致。令人

诧异的是，遥远星系光谱里的这两条暗线，却不是处在它们应处的位置上，而是稍稍移向低频端（即红端），这种现象称为“红移”。星系距离愈远，谱线“红移”愈显著，甚至使这两条应处于紫外光部分的暗线，移到了红光一端。这种某频率谱线的位移现象，说明该天体正在与观测者作相对运动。可见光谱如果发生了红移（波的频率降低，波长变长），表明该天体正在退行；若谱线发生紫移（波的频率升高，波长变长），该天体就在向我们接近。

1929年，天文学家哈勃观测了24个邻近的星系，他将这24个星系的光谱与实验室的光谱做了对比，让人吃惊的是24个星系的谱线均向长波移动。这表明它们都在向远离我们的方向运动。也就是这个现象让哈勃穷追不舍。

解释研究

斯里弗和哈勃都发现了星系的光谱红移现象，但哈勃并没有停下来，而是继续进行研究。他对这24个河外星系的视向速度和距离进行了估计。视向速度是由星系光谱红移得出的。我们用 v 表示视向速度，红移量用 z 表示。根据狭义相对论，视向速度与红移的关系为 $1+z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$ ，当 $v/c \ll 1$ 时，上

式可以化为 $v=c z$ ，即红移 z 与视向速度 v 成正比，要注意的是这里有个约束条件 $v/c \ll 1$ ，后面讲哈勃定律的实用范围时也会提到这一点。而对星系的距离的测定却是一个难题，哈勃当时是用星系中最亮的恒星的测光，以及对少数测出有造父变星的星等，估计了一批星系的距离。

我们来解释一下哈勃是怎样利用造父变星来估计星系距离的。因为造父变星的光变周期与它的光度直接相关，早在1912年，天文学家就发现了这一关系。所以，通过测量造父变星的光变周期，就能



计算出它光度，同时根据观测到的亮度，就能得到它的距离了。其实这种方法叫周期变星测距法。在今天的技术下，用此种方法可测距达 10Mpc。

哈勃以此作出了关键性的发现，星系的光度和它们的红移之间存在着很强的关系，光度越小的星等，红移越大，而光度越小表明星系离我们越远。所以这一发现的含义是红移随星系距离 D 增大而增大。并且有 $v=cZ=HD$ ，即 $v=HD$ 。

这就是著名的哈勃定律，其中 H 是与星系的光度及其他参数有关的一个常数，称为哈勃常数。当然哈勃定律适用范围是有限的，在前面得到视向速度与红移关系时，有个条件 $z=v/c \ll 1$ ，而对远处的星系测量表明其光谱的红移 z 会超过 1，在这种情况下哈勃定律就不适用了。另外，哈勃定律对太近的星系也不适用，我们所观测到的星系运动分为两部分，一是远离我们的运动，这由星系光谱红移可知；二是它自身的无规运动，又称本动，它的大小一般为几百千米每秒，只有当远离我们运动速度远大于本动时，本动就可以忽略，这就要求被测星系的距离要超过 10Mpc，哈勃定律才适用。

理论提出

经过对红移的解释，以及深入的研究，得出了哈勃定律，而根据哈勃定律除了离银河系最邻近星系（哈勃定律不适用）外，所有其他的星系都在远离我们而去。由于我们所处的位置在宇宙中不具有特殊地位，因此哈勃定律适用与宇宙任何位置上的观测者，也就是说他们所观测到的星系也在远离他们而去。这好比一个不断膨胀的气球，星系就在球面上，不管在球面哪一点，所有点都互相远离。当然这只是对宇宙膨胀的形象比喻而已，并不能说这就是宇宙的标准模型。

宇宙是膨胀的，但我们并不考虑宇宙会膨胀到哪种程度，相反我们进行逆向思维，时间越早则宇宙就越小，密度就越大。在均匀宇宙中，各部分温度应该相同，那么在它膨胀时，应属于绝热膨胀，故温度要降低，因此早期的宇宙还应有一个性质即温度高。同样我们还可以得出宇宙起源于一个很小的点，这就是所谓的宇宙大爆炸。

通过大爆炸理论我们就可以去了解宇宙的演化史。具体我们可以用宇宙的大小、温度、时间来追随宇宙简史。这里我们只以时间为线索，温度会在证明阶段提到。以爆炸时刻为零开始，可以分为以

下几个时期：

(1) 0s: 宇宙爆炸开始时刻。处于密度、温度极高状态。

(2) 10^{-45} s: 从爆炸到此刻还不能真正理解其中的物理。

(3) 10^{-35} s: 该时刻标志着大统一理论的终结。强核力和弱电力分离，因此是最初的暴涨。在此之前，夸克（反夸克）的数目和光子的相等。光子数与重子数之比为 $10^9 \sim 10^{10}$ 。

(4) 10^{-32} s: 暴涨结束，宇宙从 10^{-25} m 迅速膨胀为 0.1m，以后逐渐膨胀为现在我们所看到的宇宙 10^{26} m。宇宙的主要组分是光子、夸克和反夸克，以及有色胶子。应指出。质子是不稳定的，因此这一阶段还无元素，甚至没有氢。

(5) 10^{-12} s: 弱核力和电磁力分离，宇宙在此时期很少有活动，常称为“荒芜”时期。

(6) 10^{-2-3} s: 这是宇宙原初元素合成期。

(7) 10^{11} s: 在此时间光子和重子退耦。在此之前是辐射能密度高于物质能密度，在此之后宇宙一物质为主。因为退耦伴随着自由电子与核结合形成原子——这是我们熟悉的物质形式。

(8) 10^{16} s: 星系、行星和恒星开始形成。

(9) 10^{18} s: 现在。从这个阶段起随着时间流逝，星系继续退离，宇宙温度继续下降。

有人可能会问那大爆炸前是怎样的呢？可以说这是物理研究的空白领域。在那时，现有的一切物理理论可能都不适用。

证明阶段

既然一种理论出来，就必须靠证据来支持，而现在科学界得到了三个证据，一是微波背景辐射；二是恒星和星系物质中的氦丰度；三是宇宙的年龄。这里主要介绍微波背景辐射。

根据大爆炸理论，宇宙爆炸后 300 000 年时温度降至 3000K，这时中性氢原子已占宇宙气体的 90%，成为原子的复合期。气体处于电离状态，大量的自由电子处于自由状态。那时光子有足够频繁的碰撞来实现能量的传递，并维持热平衡。此时期过后，绝大多数电子被束缚在中性原子（如氢原子）内，自由电子急剧降低，使光子的碰撞频率急剧减小，最后完全失去碰撞机会，也就与其他粒子没有相互作用，它将在宇宙中一直存在下去。由于宇宙的膨胀，光源发出的光子红移，光子的频率就会降

低，这等效于温度下降。从理论上就可以得到背景辐射形成的温度大约为几开尔文。其实在 1948 年伽莫夫与他的同事预言了宇宙背景辐射的存在，并指出其大小为 5K 左右。如果这被证实，无疑是对大爆炸理论的决定性支持。

1964 年 5 月，美国贝尔实验室的彭齐亚斯和威尔逊在美国新泽西州的一个偏远小镇把一台喇叭型的天线指向天空用以研究来自天空的无线电噪声，这台天线具有良好的性能，能把来自地面的噪声压低在 0.3K 以下。当他们开始测量来自天空的噪声时，发现扣除大气吸收和天线本身的影响后，有一个 3.5K（波长为 7.35 厘米的微波噪声对应温度大约为 3.5K）的微波噪声相当显著。在认真检查天线的每一个接缝甚至清除了天线在内的一个鸽子窝后，噪声依旧存在。日后一年里的观测表明，这种噪声与天线在天空的指向无关，与地球的周日运动、太阳运动无关，故而，它是弥漫在空间的一种辐射即背景辐射，几乎与此同时，他们身边普林斯顿大学的迪克等人正着手制造一台小型的天线，用来探测理论学家们重复伽莫夫的工作所言的大爆炸残存的微波背景辐射。对于一个 10K 的黑体谱。其主要辐射应集中在微波波段。当迪克获知彭齐亚斯和威尔逊的发现后，立即断言这便是他们致力寻找的东西。于是两位不懂的宇宙学的工程师在美国天体物理杂志上发表了题为“在 4080MHz 上额外的天线温度测量”的短文，而这一发现荣获 1978 年的诺贝尔物理奖。这就是微波背景辐射发现的历史。

微波背景辐射是宇宙大爆炸理论的重要预言，微波背景辐射的发现和精确测定，证明了在一切星系形成前，充满宇宙的是高度均匀的气体，而且它是热平衡的。背景辐射的各向同性是早期宇宙均匀性的直接证据；而具有黑体型的谱是它高度热平衡的直接证据。

按照大爆炸理论，爆炸后宇宙中只存在质子、中子、电子、光子等基本粒子，当温度降为 10 亿 K 时，具备了核聚变条件，如同氢弹爆炸时发生的聚变过程迅速把所有的中子合成到由两个质子和两个中子构成的氦核中，经理论计算氦同氢的质量比为 1:4。而现在的天文观测数据表明，宇宙中氦和氢的比例大体与此相符，这便成了大爆炸模型的有力证据。

人类利用自己已有的知识和技术，利用物质中放射性同位素含量测定物质形成年代的方法，测量

了地球、月球及来自空间的陨石的年代，发现它们的年龄都没超过 47 亿年。科学家还通个恒星的发光功率和其燃料储备来估计，银河系最老的恒星的年龄约为 100 亿~150 亿年。而从大爆炸开始，宇宙膨胀，按照哈勃定律将星系的距离除以各自的速度，就可估计出那一时刻距今约 100 亿~200 亿年，也就是说这就是现在“宇宙年龄”的上限。由此可见，至少现在，人类所测量到的数据是支持大爆炸模型的。

一种新理论的发现，会导致这个领域，甚至相邻领域的革命。但是在时间面前，它依然还存在困难，面临着挑战。

困难与挑战

(1) 星系分布的大尺度结构。星系是由数十亿至数千亿颗恒星和气体尘埃构成的庞大天体系统，其大小从数千到数十万光年。从现在能观测到的星系的分布与微波背景辐射相比，是很不均匀的。人们利用哈勃定律通过谱线红移测定了数万个星系的距离。从而描绘出星系在三维分布中的图像。分析结果表明，星系像是集中在一堆肥皂泡的泡壁上，壁上星系密度为平均值的 5 倍，而内密度为平均密度的 1/5（成为空洞）。这样大尺度的不均匀性是如何形成的？除了引力之外还有无别的参与？这是任何宇宙演化理论都必须回答的关键问题。

(2) 暗物质问题。早在 20 世纪 20 年代，在星团动力学的研究中，发现由动力学方法测定的星团质量远大与由光度推算出来的质量。这就是说，存在着不能直接探测到的“暗物质”。从得到的数据来看，平均宇宙密度中，暗物质要占 90%。暗物质是什么？为什么暗物质在宇宙整体中的分量如此之大？等等这都是摆在我们面前的一大挑战。

(3) 大爆炸初期及爆炸前的宇宙。根据大爆炸理论，在爆炸那一刻，密度极大，温度极高，体积很小，而爆炸的这种能量是从哪里来，是一种什么样的能？而在爆炸之前，物理理论是什么？这不仅是物理研究的前沿，而且是天文、哲学研究前沿。

当然，大爆炸理论面临的问题不仅仅是以上三个问题，还有更多问题等待解决。现在大爆炸理论不断地被修正和完整，也许有一天它会被其他理论取代，但它所取得的成功是不可能淹没的。

（湖南湘南学院物电系 423000）

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖